

Anordnung zur Minimierung bzw. Kompensation  
PMD-bedingter Verzerrungen in optischen  
Transmissionssystemen und insbesondere  
Transmissionsfasern

---

BESCHREIBUNG

**Technisches Gebiet**

Die Erfindung bezieht sich auf eine Anordnung zur Minimierung bzw. Kompensation von Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere Transmissionsfasern.

Da jede Glasfaser ungewollt in geringem Umfange doppelbrechend ist, laufen Lichtsignale unterschiedlicher Polarisation mit verschiedenen Gruppengeschwindigkeiten durch die Glasfaser. Beim Empfänger kommen die Lichtanteile unterschiedlicher Polarisation daher zeitlich gegeneinander verzögert an; dieser Laufzeiteffekt führt zu einer Verbreiterung des empfangenen Signals und damit zu einer Beeinträchtigung der Übertragungsqualität. Dies kann insbesondere zu einer Erhöhung der Bitfehler-rate führen. Die nutzbare Übertragungsrate in Lichtwellenleiter-Kommunikationsnetzen ist damit durch PMD-bedingte Verzerrungen eingeschränkt. Aufgrund der zeitlich fluktuierenden PMD der Übertragungsstrecke kann es zu hohen Bitfehlerraten und zeitweisen Ausfällen der Übertragung kommen. Besonders für die Aufrüstung bereits installierter Faserstrecken auf höhere Übertra-

gungsraten ist die vorhandene PMD der Strecke ein limitierender Faktor.

Die Polarisations-Moden-Dispersion umfaßt dabei alle polarisationsabhängigen Laufzeiteffekte, bei denen sich die Signalausbreitung vollständig durch das Ausbreitungsverhalten zweier voneinander unabhängiger und zueinander orthogonaler Polarisationsmoden beschreiben läßt. Da sich die Doppelbrechung durch äußere Einflüsse, wie Temperatur und mechanische Belastung ständig ändert, und zudem von der Wellenlänge abhängt, verändert sich permanent sowohl die Lage der „principal states of polarisation“ (i.f. kurz als **PSP** bezeichnet) als auch die Laufzeitdifferenz zwischen den PSP's. Dies bezeichnet man auch als Polarisations-Moden-Dispersion (**PMD**) **zweiter Ordnung**.

Aus den genannten Effekten resultiert ein zeitlich fluktuierendes wellenlängenabhängiges PMD-Verhalten mit Zeitkonstanten im ms-Bereich bis hin zum Minuten-Bereich.

Verzerrungen in Transmissionssystemen, die durch Polarisations-Moden-Dispersion (PMD) erzeugt werden, müssen für hochratige Datenübertragungen kompensiert werden, um die Signalqualität zu erhalten.

#### **Stand der Technik**

Der Einfluß von Polarisations-Moden-Dispersion auf langen, hochratigen Übertragungsstrecken sind in den zurückliegenden Jahren intensiv untersucht und gemessen worden.

Hierzu wird auf folgende Artikel verwiesen, auf die - wie auch auf die anderen nachfolgend noch genannten Artikel - im übrigen zur Erläuterung aller hier nicht näher beschriebenen Einzelheiten ausdrücklich Bezug genommen wird:

- Poole, C. D.; Tkach, R. W.; Chraplyvy, A. R.; Fishman, D. A.:  
Fading in Lightwave systems Due to Polarization-Mode Dispersion  
IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 1, 1991, p. 68-70
- Clesca, B.; Thiery, J.-P.; Pierre, V.; Havard, V.; Bruyère, F.:  
Impact of polarisation mode dispersion on 10 Gbit/s terrestrial systems over non-dispersion-shifted fibre  
Electronics Letters, Vol. 31, No. 18, 1995, p. 1594-1596

Weiterhin sind auch die Auswirkungen von PMD 2. Ordnung wie auch von polarisationsabhängiger Dämpfung (PDL) analysiert worden:

- Bruyère, F.:  
Impact of First- and Second-Order PMD in Optical Digital Transmission Systems  
Optical Fiber Technology 2 (1996), Article 33, p. 269-280
- Gisin, N.; Huttner, B.:  
Combined effects of polarization mode dispersion dependent losses in optical fibers  
Optics Communications 142 (1997), p. 119-125

Besonders ältere, in den Anfangsjahren der Glasfaserübertragung installierte Fasern weisen eine hohe PMD auf. Für künftige zu installierende Strecken gilt eine Obergrenze von 0,5 ps/√km. Die Faserhersteller sind zwar

bemüht, diesen Höchstwert zu unterbieten, bei hohen Übertragungsraten und langen Strecken ist aber auch der Einfluß einer derart vergleichsweise kleinen PMD störend.

Andere dispersive Effekte wie die chromatische Dispersion können durch geeignete Wahl der Wellenlänge oder durch dispersionskompensierte Fasern in ihrer Auswirkung zurückgedrängt werden.

Der einzige, die Bandbreite und die Streckenlänge limitierende Faktor ist damit die PMD.

Wegen des zeitlich invarianten Auftretens der PMD ist eine Kompensation mit einer Faser konstanter PMD nicht möglich. Verschiedene Simulationen, hierzu wird auf

- Ozeki, T.; Kudo, T.:  
Adaptive equalization of polarization-mode dispersion  
OFC/IOOC 1993, Technical Digest, p. 143-144

verwiesen und Laborexperimente, hierzu wird auf

- Hakki, B. W.:  
Polarization Mode Dispersion Compensation by  
Phase Diversity Detection  
IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 9, No. 1,  
1997, p.121-123

verwiesen, zur breitbandigen und flexiblen Gestaltung eines PMD-Kompensators sind bekannt. Diese Veröffentlichungen betreffen jedoch Labormuster, die nicht praxistauglich sind.

Aus der Literatur sind verschiedene Lösungsansätze zur PMD-Kompensation bekannt, wobei im Hinblick auf eine Realisierung nur empfangsseitige Maßnahmen aussichtsreich sind. Dazu zählen:

- die Veränderung der PSP der Faserstrecke durch einen empfangsseitigen Polarisationssteller derart, daß die Polarisation des Sendelasers mit einem PSP zusammenfällt,
- die Verwendung eines Polarisations-Diversitäts-Empfängers mit einem vorgeschalteten Polarisationssteller, der die Signale des schnellen und langsamen PSP voneinander trennt, und nach einer elektrischen Verzögerungsleitung wieder zusammenfügt,
- die Verwendung einer hochdoppelbrechenden Faser mit konstanter PMD und vorgeschaltetem Polarisationssteller.

Ferner ist es bekannt, durch Einsatz von Hochgeschwindigkeitselektronik eine elektronische PMD-Entzerrung auszuführen sowie zur PMD-Kompensation ein mechanisches verstellbares Verzögerungsglied zu verwenden.

Die erwähnten Vorschläge sind entweder unvollständig, weil die Art und Weise der gezielten Regelung nicht geklärt ist, haben einen hohen Aufwand an optischen und elektrischen Komponenten oder funktionieren nicht zufriedenstellend. Marktreife Produkte sind bis jetzt weltweit nicht bekannt.

Ein Grund hierfür liegt zum einen darin, daß in der Vergangenheit keine Meßeinrichtung für PMD-bedingte

Verzerrungen zur Verfügung gestanden hat, die ausreichend schnell und hinreichend einfach aufgebaut ist.

Ein weiterer Grund hierfür ist, daß es keine Emulationseinheit gegeben hat, die die PMD einer realen Transmissionsfaser möglichst exakt nachbilden kann.

#### **Darstellung des erfindungsgemäß gestellten Problems**

Typische Anforderungen an einen PMD-Kompensator für optische Übertragungsstrecken sind:

- großer kompensierbarer Bereich: z.B. 0 bis 100 ps,
- Ausregeln bis auf möglichst geringe Rest-PMD,
- schnelles Ausregeln bei Fluktuationen auf der Faserstrecke,
- sicheres Regelverhalten für jede Art der PMD und insbesondere für PMD mit unterschiedlicher PSP,
- kein Verharren der Regelung in lokalen Minima,
- geringe Einfügedämpfung,
- geringe Varianz der Einfügedämpfung.

#### **Darstellung der Erfindung**

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Anordnung zur Minimierung bzw. Kompensation PMD-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere Transmissionsfasern anzugeben, die eine schnelle und praxisgerechte Kompensation der PMD-bedingten Verzerrungen - insbesondere im Hinblick auf die vorstehend genannten Anforderungen - erlaubt.

Erfindungsgemäße Lösungen dieser Aufgabe sind in den unabhängigen Patentansprüchen angegeben. Weiterbildungen dieser Lösungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

Eine Anordnung, mit der PMD-bedingte Verzerrungen minimiert bzw. kompensiert werden können, muß eine Meßeinrichtung für die PMD-bedingten Verzerrungen aufweisen. Des weiteren muß (wenigstens) eine Emulationseinheit für einstellbare PMD-Werte sowie gegebenenfalls wenigstens ein Anpaßelement bzw. ein Polarisationsstransformationselement vorhanden sein, das die PSP's der aus einem Transmissionssystem austretendem Signale an die PSP's der PMD-Emulationseinheit anpaßt.

Erfindungsgemäß werden sowohl die Emulationseinheit als auch die Meßeinrichtung für die PMD-bedingten Verzerrungen sowie die Regeleinheit und das verwendete Regelkriterium (alleine oder in Kombination) weitergebildet.

Bei der erfindungsgemäß ausgeführten Emulationseinheit kommt ein optisch arbeitendes variables PMD-Verzögerungsglied zum Einsatz. Dieses besteht bevorzugt aus zwei dispersiven Elementen konstanter PMD, die über ein Polarisationsstellglied zu einem variablen PMD-Glied verbunden sind.

Durch Einfügen eines variablen, selbsttätigen PMD-Kompensators zwischen Übertragungsstrecke und optischem Empfänger gelingt es, die PMD-bedingten Verzerrungen optisch zu kompensieren und so die Bitfehlerrate zu minimieren. Die Übertragungskapazität der Strecke und die

maximal überbrückbare Entfernung können damit durch Einsatz dieses PMD-Kompensators vervielfacht werden.

Bei einer bevorzugten Lösung der Erfindung, die die Emulationseinheit betrifft, weist die Emulationseinheit einen PMD-Emulator auf, der auch die PMD 2.ter Ordnung emulieren kann und der die PMD einer realen Transmissionsfaser möglichst exakt nachbildet. Die erfindungsgemäß derart ausgebildete Emulationseinheit hat den besonderen Vorteil, daß kein vorgeschaltetes Polarisationsstransformationselement nötig ist. Selbstverständlich ist es aber auch möglich, wenn auch nicht notwendig, die zu kompensierende Faserstrecke mit dem einstellbaren PMD-Verzögerungsglied über ein weiteres Polarisationsstellglied zu verbinden, das endlos arbeitet und die Principal States of Polarization (PSP) beider PMD-Elemente zur Deckung bringt.

Bei der genannten bevorzugten Weiterbildung der Erfindung wird von einer Anordnung zur Kompensation Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere Transmissionsfasern ausgegangen, die eine Meßeinrichtung für PMD-bedingte Verzerrungen, eine Emulationseinheit für einstellbare PMD-Werte und eine Regelungseinheit aufweist, an der das Ausgangssignal der Meßeinrichtung anliegt, und die die Emulationseinheit steuert.

Erfindungsgemäß weist diese Emulationseinheit mindestens eine Basis-Emulationseinheit auf, die aus zwei DGD-Elementen (Differential-Group-Delay-Elemente) mit



z.B. jeweils einer bestimmten festen Verzögerungszeit für das ankommende Signal besteht, die miteinander über ein Verbindungselement verbunden sind, das als Transformationselement wirkt, wobei alle drei Elemente einen bestimmten Winkel der Doppelbrechungsachsen zueinander haben.

Die Doppelbrechungsachsen des Verbindungselements unterscheiden sich bezüglich ihrer Winkellage von den Doppelbrechungsachsen der beiden DGD-Elemente. Weiterhin ist wenigstens ein Stellelement für jede Basis-Emulationseinheit vorgesehen, das auf eines der Elemente dieser Basis-Emulationseinheit und bevorzugt auf das Verbindungselement derart wirkt, daß durch eine geringfügige Änderung der Verzögerungszeit des beeinflussten Elements die DGD der Anordnung vollständig einstellbar ist.

Als dispersive Elemente und insbesondere als DGD-Elemente, die in der erfindungsgemäßen Anordnung eingesetzt werden können, können die verschiedensten, aus dem Stand der Technik bekannten Elemente verwendet werden.

Als Polarisationssteller, die die wesentlichen Parameter der Gesamtanordnung, wie Reaktionszeit, Einfügedämpfung und Langlebigkeit bestimmen stehen ein Vielzahl von Polarisationssteller-Varianten zur Verfügung:

- drehbare  $\lambda/2$ - und  $\lambda/4$ -Wellenplatten im freien Strahlengang
- Faserquetscher, Krafteinwirkung auf hochdoppelbrechende Fasern,

- Lithiumniobat oder andere elektrisch steuerbare, doppelbrechende Kristalle,
- magnetooptische YIG-Kristalle,
- nematische oder ferroelektrische Flüssigkristalle.

Die genannten Elemente können durch geeignete Faseran-  
kopplungen in faseroptische Systeme integriert werden.

Insbesondere können die Elemente PM-Fasern sein. Das Stellelement kann in diesem Falle auf wenigstens eines der DGD-Elemente, vorteilhafterweise auf das Verbindungselement eine mechanische Wirkung zur Änderung der Verzögerungszeit und damit der Polarisierung ausüben. Insbesondere können das oder die Stellelemente, die eine mechanische Wirkung ausüben, Faserquetscher oder -stretcher mit elektrisch steuerbaren Elementen, wie Piezo-Elementen sein, die die mechanische Wirkung auf die PM-Faser ausüben.

Die Realisierung der unterschiedlichen Winkel der Doppelbrechungsachsen kann im Falle von PM-Fasern vorteilhafterweise durch Spleißen der einzelnen PM-Fasern unter dem gewünschten Winkel erfolgen.

Dabei ist es besonders bevorzugt, wenn wenigstens eines der Stellelemente zur Verteilung der mechanischen Wirkung auf eine möglichst große Faserlänge einen Ring aufweist, auf dem die PM-Faser ohne Verdrehung bzw. Verdrillung aufgewickelt ist. Vorteilhaft ist es ferner, wenn wenigstens ein druckausübendes Element an wenigstens einer Stelle Druck auf eine Mehrzahl von Faserstücken der aufgewickelten Faser ausübt. Dieses

druckausübende Element kann ein elongierendes Element, wie ein Piezoelement oder ein magnetostriktives Element, sein, das wenigstens ein Kreissegment beaufschlagt, das am Ring anliegt. Hierbei sind bevorzugt zu wenigstens einem Teil der Kreissegmente Gegensegmente vorgesehen, die an den Faserstücken anliegen und Druck auf die Faser ausüben.

Alternativ und/oder zusätzlich zur Verwendung von PM-Fasern können die Elemente doppelbrechende Kristalle, deren Doppelbrechung elektronisch beeinflussbar ist oder die anderen vorstehend genannten Elemente sein.

In jedem Falle ist es bevorzugt, wenn die Verzögerungszeit der beiden DGD-Elemente jeder Basis-Emulationseinheit gleich und deutlich größer als die des zugehörigen Verbindungselements ist.

Weiterhin ist es von Vorteil, wenn der Winkel der Doppelbrechungsachse des ersten DGD-Elements  $0^\circ$  und des zweiten DGD-Elements  $90^\circ$  und des Verbindungselements  $45^\circ$ , also eine Anordnung  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  oder alternativ  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ$  oder  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ$  oder entsprechend gewählt ist.

Bei einer Ausgestaltung der Erfindung ist den zwei DGD-Elementen und dem Verbindungselement ein weiteres Element zur Einstellung eines beliebigen Eingangs-PSP vorgeschaltet, das insbesondere ein weiteres doppelbrechendes Element, wie z.B. eine PM-Faser, aufweisen kann. Der Winkel der Doppelbrechungsachsen des vorgeschalteten Elements und des ersten DGD-Elements

unterscheiden sich notwendigerweise. Die Winkeldifferenz beträgt bevorzugt  $45^\circ$ . Die Einstellung der EingangspSP kann im Falle einer PM-Faser insbesondere durch Ausübung einer mechanischen Wirkung auf das vorgeschaltete Element oder auf das vorgeschaltete Element und auf das erste DGD-Element erfolgen.

Das vorgeschaltete Element und/oder das Verbindungselement können aus zwei PM-Fasern oder zwei doppelbrechenden Kristallen mit unterschiedlicher Winkellage der Doppelbrechungsachsen, bevorzugt  $90^\circ$  zueinander, bestehen, wobei insbesondere das Stellelement auf eine der beiden Fasern oder auf einen der Kristalle wirkt.

Um auch PMD höherer Ordnung kompensieren zu können, ist es bevorzugt, wenn mindestens zwei Anordnungen zur Einstellung einer variablen DGD, von denen wenigstens eine eine Basis-Emulationseinheit gegebenenfalls mit einem PSP-Einstellelement aufweist, hintereinander geschaltet sind. Vorteilhaft ist es hierbei, wenn die einzelnen Anordnungen zur Kompensation PMD höherer Ordnung aus Basis-Emulationseinheiten mit DGD-Elementen mit unterschiedlicher Laufzeit bestehen.

Erfindungsgemäß ist die Meßeinrichtung so ausgebildet, daß sie zur Erfassung der PMD-Verzerrung die Polarisierung aller in dem aus der Emulationseinheit austretenden Signal enthaltenen Spektralanteile erfaßt. Hierzu kann die Polarisations-Meßeinrichtung aus jedem beliebigen Polarimeter bestehen; beispielsweise kann eine Anordnung aus mindestens drei Fotodioden zur Erfassung der Stokes-Parameter eingesetzt werden.

Bevorzugt im Rahmen der Erfindung ist jedoch eine möglichst einfache Anordnung, die z.B. aus einem Polarisator und einem nach dem Polarisator angeordneten optoelektrischen Wandler, wie einen Fotoempfänger besteht.

Alternativ ist es möglich, daß die Meßeinrichtung einen Polarisationsstrahlteiler aufweist, an dessen Ausgangsanschlüssen optoelektrische Wandler, wie Fotoempfänger vorgesehen sind, deren Signale zur Generierung eines Ist-Signals für die Regeleinheit einer Quotientenbildung unterzogen werden.

Vor der eigentlichen Polarisations-Meßeinrichtung kann eine Polarisationsanpaßeinheit vorgesehen sein, die die Ausgangspolarisation der Emulationseinheit an die des Polarisators anpaßt, und die Polarisation z.B. so einstellt, daß auf Leistungsminimum nach dem Polarisator geregelt werden kann.

Die Polarisations-Anpaßeinheit kann wahlweise direkt an der Polarisations-Meßanordnung oder direkt hinter der PMD-Emulationseinheit und noch vor dem Abzweig-Koppler zur Polarisationsmeßeinheit angeordnet sein.

Die Polarisationsanpaßeinheit kann beispielsweise zwei doppelbrechende Elemente aufweisen, deren Doppelbrechungsachsen einen Winkel ungleich  $0^\circ$ , bevorzugt  $45^\circ$  einschließen; zur Einstellung der Ausgangspolarisation kann wenigstens ein Stellelement vorgesehen sein, das auf mindestens eines der doppelbrechenden Elemente

wirkt. Diese Elemente können doppelbrechende Kristalle oder PM-Fasern sein.

Das Signal zur Nachregelung des PMD-Kompensators kann direkt aus dem detektierten Signal des optischen Empfängers über elektrische Filterung gewonnen werden. Zwei unterschiedliche Durchlaßkurven der Filter gestatten eine Bewertung des detektierten Signals hinsichtlich der aufgetretenen Verzerrungen unabhängig von der Signalleistung. Ein Regelalgorithmus optimiert die Polarisations-elemente des PMD-Kompensators, so daß das detektierte Signal des Empfängers geringste PMD-Verzerrungen aufweist.

Besonders bevorzugt ist es, wenn eine Anordnung zur Kompensation Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionsystemen und insbesondere Transmissionsfasern derart weitergebildet wird, daß die Regeleinheit mehrere Regelschleifen aufweist, in denen sie Stillelemente der Emulationseinheit mit unterschiedlichen Frequenzen moduliert - ähnlich der Dither-Technik -, daß die Regeleinheit aus dem Ausgangssignal der Meßeinrichtung Informationen über den Betrag und die Phasenlage des aus der Emulationseinheit austretenden Signals ermittelt und diese Informationen zur Durchführung einer schnellen und direkten Regelung verwendet, und daß die Regeleinheit die einzelnen Regelschleifen derart einstellt, daß die Polarisation für alle im Signal enthaltenen Spektralanteile konstant ist.



Durch diese erfindungsgemäße Ausbildung kann unter anderem auf die Verwendung von Reset-Algorithmen verzichtet werden.

Im Rahmen der Erfindung - auch i. S. einer unabhängigen Lösung - ist es jedoch von besonderem Vorteil, wenn Elemente verwendet werden, die eine mechanische Wirkung ausüben. Diese Elemente können insbesondere Faserquetscher oder -stretcher mit elektrisch steuerbaren Elementen, wie Piezo-Elementen sein, die eine mechanische Wirkung auf die Faser ausüben.

Bei der Verwendung von Elementen, die eine mechanische Wirkung ausüben, ist es von besonderem Vorteil, wenn diese zur Verteilung der mechanischen Wirkung auf eine möglichst große Faserlänge einen Ring aufweisen, auf dem die Faser ohne Verdrehung aufgewickelt ist. Hierdurch ist es aufgrund der langen effektiven Faserstrecke möglich, mit vergleichsweise geringen Drücken zu arbeiten. Damit können Fasern mit einem Standard-Coating eingesetzt werden, ohne daß die Lebensdauer der Faser in der Praxis verkürzt werden würde. Ansonsten wäre es erforderlich, ein besonders hartes Coating zu verwenden, damit die Lebensdauer zumindest nicht über Gebühr verringert wird.

Bei einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung ist wenigstens ein druckausübendes Element vorgesehen, das an wenigstens einer Stelle Druck auf eine Mehrzahl von Faserstücken der aufgewickelten Faser ausübt. Dieses druckausübende Element kann insbesondere ein elongierendes Element, wie ein Piezoelement sein, das wenig-



stens ein Kreissegment der aufgewickelten Fasern beaufschlagt und das am Ring anliegt. Korrespondierend zu den Kreissegmenten sind Gegensegmente vorgesehen, die an den Faserstücken anliegen und Druck auf die Faser ausüben. Diese Ausbildung hat den Vorteil, daß eine Druckausübung auf die Faser ohne "Strecken" der Faser erfolgt. Bei der Ausgestaltung ist es von Vorteil, wenn sie so erfolgt, daß sich keine thermischen Einflüsse auf das DGD-Element ergeben.

Da erfindungsgemäß bevorzugt die Ableitung des Regelkriteriums optisch erfolgt, also nicht erst nach optoelektronischer Wandlung, ergeben sich in diesem Falle folgende Vorteile:

- a) die PMD-Kompensator-Anordnung ist unabhängig von der Bitrate des Datensignals (10 GBit oder höher).
- b) die PMD-Kompensator-Anordnung ist unabhängig von der Signalkodierung (RZ, NRZ, etc.).
- c) die maximal zu kompensierende DGD ist nicht limitiert, wie z.B. bei konventionellen Anordnungen, bei den das Limit bei 100 ps für 10 Gbit bw. 25 ps bei 40 Gbit liegt.
- d) Durch die optische Signalverarbeitung können kostengünstige optoelektronische Wandler mit niedriger Grenzfrequenz (im kHz-Bereich statt im GHz-Bereich wie beim Stand der Technik) eingesetzt werden.

Unabhängig von der Ableitung des Regelkriteriums ergeben sich folgende weitere Vorteile:

- a) Schnelle Kompensationszeit
- b) Geringe Einfügedämpfung
- c) Einfacher und kostengünstiger Aufbau
- d) Robuster Aufbau
- e) Keine trial- und error-Regelung erforderlich.

Wenn erfindungsgemäß die Modulation der Stellelemente mit unterschiedlichen Frequenzen erfolgt, ergeben sich weiter folgende Vorteile:

- a) kein Reset-Algorithmus notwendig,
- b) keine trial- und error-Regelung erforderlich, und
- c) keine aufwendigen Signalprozessoren.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnung

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher beschrieben, in der zeigen:

- Fig. 1 den prinzipiellen Aufbau einer erfindungsgemäß aufgebauten Basis-Emulationseinheit,
- Fig. 2 eine Weiterbildung der in Fig. 1 dargestellten Basis-Emulationseinheit,
- Fig. 3 ein erstes Ausführungsbeispiel, und,
- Fig. 4 ein zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Anordnung zur Minimierung bzw. Kompensation Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen,

Fig. 5 ein Beispiel für einen als Polarisationssteller eingesetzten Rotator,

Fig. 6 ein Beispiel für einen Polarisationssteller für die PSP-Anpassung, und

Fig. 7 ein Beispiel für einen Faserquetscher.

#### **Darstellung von Ausführungsbeispielen**

Fig. 1 zeigt den Aufbau einer erfindungsgemäßen Basis-Emulationseinheit. Diese weist zwei DGD-Elemente (Differential-Group-Delay-Elemente) DGD-1 und DGD-2 auf, die jeweils eine bestimmte feste Verzögerungszeit für das ankommende Signal haben, die bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel ohne Beschränkung der möglichen Werte 50 ps beträgt. Die beiden DGD-Elemente DGD-1 und DGD-2 sind miteinander über ein Verbindungselement T-DGD verbunden, dessen Verzögerungszeit bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel 1 ps beträgt.

Alle drei Elemente haben einen bestimmten Winkel der Doppelbrechungsachsen, wobei sich die Doppelbrechungsachse des Verbindungselements T-DGD bezüglich ihrer Winkellage von den Doppelbrechungsachsen der beiden DGD-Elemente DGD-1 und DGD-2 unterscheiden. Bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel betragen die (absoluten) Winkel  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  (in der Grundstellung) und  $90^\circ$ .

Bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel ist ferner ein in der Fig.1 nicht dargestelltes Stellelement vorgesehen,

das auf das Verbindungselement T-DGD derart wirkt, daß durch eine geringfügige Änderung der Verzögerungszeit dieses Elements die DGD der Anordnung vollständig einstellbar ist. Das Verbindungselement T-DGD wirkt damit als Transformationselement.

Bevorzugt ist es, wenn bei dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel die Elemente DGD-1, DGD-2 und T-DGD PM-Fasern sind. Die Winkel können dann durch Spleißen eingestellt werden. Das Stellelement kann dann auf wenigstens eine der PM-Fasern eine mechanische Wirkung zur Änderung der Verzögerungszeit und damit der Polarisierung ausüben, und beispielsweise ein Faserquetscher oder -stretcher mit elektrisch steuerbaren Elementen, wie Piezo-Elementen sein.

Mit dieser Anordnung kann man eine Gesamt-DGD von 0 ps bis zur Summe der Einzel-DGD's (ca. 100 ps) einstellen, wobei hierfür lediglich eine Änderung der DGD des Transformationselements T-DGD um 0,0025 ps ausreichend ist.

Fig. 2 zeigt eine Modifikation des in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiels, bei dem gleiche Teile wie in Fig. 1 mit den selben Bezugszeichen versehen sind.

Bei diesem Ausführungsbeispiel ist einer Anordnung bestehend aus den Elementen DGD-1, T-DGD und DGD-2 ein weiteres Element A-DGD vorgeschaltet, das bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel einen Winkel von  $45^\circ$  und eine Verzögerungszeit von 1 ps hat. Bei dem gezeigten

Ausführungsbeispiel beträgt die Verzögerungszeit der Elemente DGD-1 und DGD-2 ohne Beschränkung der Allgemeinheit jeweils 30 ps.

Zusätzlich sind auch Stellelemente für das Element A-DGD und das Element DGD-1 vorgesehen. Mit diesen Stellelementen ist es möglich, die PSP der Anordnung dem jeweiligen Einsatzfall anzupassen. Das Stellelement für das Transformationselement T-DGD dient wie bei Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1 zur Einstellung der DGD. Die Anordnung gemäß Fig. 2 hat gegenüber der Anordnung gemäß Fig. 1 den Vorteil, daß die Wellenlängenabhängigkeit der PSP kompensiert werden kann.

Fig. 3 zeigt eine Anordnung zur Kompensation Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere Transmissionsfasern, bei der zwei hintereinander geschaltete Basis-Emulationseinheiten 1 und 2 verwendet werden, von denen jede gemäß Fig. 2 aufgebaut ist, und die zur Einstellung der PSP und der DGD des aus dem Transmissionssystem, beispielsweise einer Transmissionsfaser kommenden Signals IN dienen. Das aus der zweiten Basis-Emulationseinheit 2 austretende Signal tritt in einen Strahlteiler 3 ein, der einen kleinen Teil des Signals (1 bis 5%) in eine Meßeinrichtung für PMD-bedingte Verzerrungen abzweigt.

Diese Meßeinrichtung weist einen Polarisationskontrollier 4 auf, der aus zwei Faserstücken mit jeweils einer (bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel) Verzögerungszeit von 1 ps besteht, die unter einem Winkel von  $45^\circ$

miteinander verbunden sind. Auf die beiden Faserstücke wird in der nachfolgend noch beschriebenen Weise zur Einstellung der Polarisierung Druck ausgeübt. Das aus dem zweiten Faserstück austretende Signal tritt in einen Polarisator 4' ein, dem ein Fotoempfänger 5 mit einem Verstärker 6 mit Tiefpaßwirkung nachgeschaltet ist. Das Ausgangssignal des Verstärkers 6 dient als Eingangs- bzw. IST-Signal für die nachfolgend beschriebene Regeleinheit, mit der die Einstellung der Verzögerungszeit der verschiedenen Faserstücke erfolgt.

Die Regeleinheit weist für jedes der - auch in Fig. 3 nicht dargestellten - Stellelemente - einen phasenempfindlichen Verstärker 7 auf, dessen Ausbildung in dem Teilbild in Fig. 3 dargestellt ist. Jeder der Verstärker 7 hat eine vergleichsweise geringe Bandbreite von z.B. 2 kHz, wobei die Frequenz typischerweise im Bereich von 50 bis 90 kHz liegt. Das Ausgangssignal des phasenempfindlichen Verstärkers 7 liegt an Leistungsverstärkern 8 an, deren Ausgangssignal die Stellelemente, die beispielsweise Piezoelemente aufweisen und insbesondere gemäß Fig. 7 ausgebildet sein können, ansteuert.

Die erfindungsgemäß ausgebildete Emulationseinheit arbeitet wie folgt:

Die Regelung des PDMC besteht aus voneinander unabhängigen analogen Regelschleifen, die nach dem Prinzip der modulierten Stellelemente arbeiten. Die Ansteuerung der Stellelemente erfolgt durch geeignete Frequenzwahl

(z. B. 50,55,... 90 kHz) für die Modulation der einzelnen Stellelemente.

Das Regelkriterium ist die Konstanz der Polarisierung für alle im Signal enthaltenen Spektralanteile (DOP = 100% und Polarisation = Constant). Die Polarisation vor dem Polarisator wird so eingestellt, daß ein Minimum an Leistung transmittiert wird. Dies liefert ein sehr genaues Kriterium für DOP und SOP. Die Modulationsfrequenzen gelangen mit entsprechender Amplitude und Phasenlage auf den Fotoempfänger 5 und stehen für eine frequenzselektive und phasenrichtige Auswertung zur Verfügung. Damit können auch die Regelkreise für die einzelnen Stellelemente zeitgleich und voneinander unabhängig optimiert werden.

Fig. 4 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Anordnung zur Minimierung bzw. Kompensation Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere einer als Übertragungsstrecke verwendeten Transmissionsfaser IN; auch dieses Ausführungsbeispiel beruht auf dem Grundgedanken, die PMD der Übertragungsstrecke durch Gegenschalten eines variablen PMD-Verzögerungsgliedes 1 zu kompensieren. Das PMD-Verzögerungsglied 1 ist über einen variablen Polarisationssteller 1' mit dem Ausgang der zu kompensierenden Faser IN verbunden. Nach dem Verzögerungsglied 1 ist ein optische Empfänger 5 mit einem Verstärker 6 angeordnet, dem ein Leistungsteiler 51 nachgeschaltet ist, der das detektierte Datensignal 52 des optischen Empfängers 5 auf Filter 53 und 54 aufteilt, denen Detekto-

ren 55 nachgeschaltet sind. Die Ausgangssignale 55' und 55" der Detektoren 55 liegen an einer Regeleinheit 56 an, die mittels eines Regelalgorithmus ein Regelsignal gewinnt, das eine Abhängigkeit vom Verzerrungsgrad des Datensignals 52 beinhaltet. Das Regelsignal wird benutzt, um die Parameter des variablen PMD-Verzögerungsgliedes 1 und des Polarisationsstellers 1' so nachzuregeln, daß die Signalverzerrung minimal wird.

Das variable PMD-Verzögerungsglied 1 besteht hierzu aus zwei gleichartigen dispersiven Elementen 11, die z.B. über einen Polarisationssteller 12 verbunden sind. Je nach Polarisationsumwandlung ist damit die resultierende PMD dieses PMD-Verzögerungsgliedes 1 von 0 bis zur Summe der Einzeldispersionen stufenlos einstellbar.

Beispielhaft können die dispersiven Elemente 11 zwei linear doppelbrechende Elemente sein und aus hochdoppelbrechenden Fasern (= polarisationserhaltende Fasern) bestehen. Die resultierende PMD beträgt dann:

$$(PMD\ 1 + PMD\ 2) * \cos(Polarisationsdrehwinkel).$$

Als Polarisationssteller eignet sich z.B. ein einfacher Rotator, wie z.B. eine  $\lambda/2$ -Wellenplatte oder ein Faraday-Rotator. Alternativ kann der gleiche Effekt erreicht werden, indem die beiden dispersiven Elemente an ihrer Koppelstelle gegeneinander verdreht werden.

Fig. 5 zeigt beispielhaft einen Rotator basierend auf einer  $\lambda/2$ -Wellenplatte. Das Licht aus der polarisationserhaltenden Faser PMF 20 wird mit einer Linse 21



kollimiert, durchläuft die  $\lambda/2$ -Platte 22 und wird mit einer weiteren Linse 23 in die PMF-Ausgangsfaser 24 fokussiert.

Der variable Polarisationssteller 1' hat die Aufgabe, die beiden Principal States of Polarization (PSP) der zu kompensierenden Faser auf die PSP des variablen PMD-Verzögerungsgliedes 1 abzubilden, so daß der 'schnelle' PSP der Faser mit dem 'langsamen' PSP des Verzögerungsgliedes zusammenfällt und der 'langsame' PSP der Faser mit dem 'schnellen' PSP des Verzögerungsgliedes zusammenfällt.

Der variable Polarisationssteller 1' arbeitet endlos, d.h. er hat in keiner Richtung eine mechanische oder polarisationsoptische Begrenzung. Für diese Aufgabe reicht es nicht aus, daß der Polarisationssteller 1' jede beliebige Eingangspolarisation in jede beliebige Ausgangspolarisation umwandeln kann. Der Polarisationssteller 1' muß deshalb genügend Freiheitsgrade besitzen, um in allen Fällen eine globale Minimierung der Gesamt-PMD vornehmen zu können. Stehen zu wenig Freiheitsgrade zur Verfügung, besteht die Gefahr, daß die Regelung in einem lokalen PMD-Minimum verharret und nicht das globale Minimum findet.

Beispielhaft kann der variable Polarisationssteller 1' gemäß Fig. 6 aus vier hintereinander angeordneten  $\lambda/4$ -Wellenplatten 32 - 35 bestehen, die frei drehbar sind. Alle Polarisations Transformationen sind endlos, d.h. ohne einen aufwendig zu umgehenden Anschlag möglich. Zur Auskopplung des Lichts aus der single-mode-

10

•

•

Beispielhaft werden zwei unterschiedliche Filter (53 + 54) eingesetzt. Filter 53 ist ein Bandpaß, der die Grundfrequenz bei 5 GHz selektiert, während Filter 54 als Hochpaß ausgeführt sein kann, um Frequenzen ab ca. 15 GHz auszufiltern. Die beiden nachgeschalteten Detektoren 55 überführen die Signalamplituden in zwei analoge Signale 55' und 55". Das Verhältnis dieser beiden Analogwerte zueinander gibt dann als Regelsignal den Verzerrungsgrad des Datensignals unabhängig von der Signalleistung wieder. Der Regelalgorithmus der Regeleinheit 56 strebt danach, das Regelsignal zu minimieren, indem er z. B. abwechselnd an allen polarisationsbeeinflussenden Elementen geringfügige Änderungen vornimmt.

Dies ist sehr schnell möglich, so daß die PMD-Kompensation in Echtzeit ablaufen kann. Führt die Änderung zu einer Verkleinerung des Regelsignals bleibt sie bestehen, wenn nicht, wird sie verworfen und das nächste Polarisationsselement wird einer Änderung ausgesetzt.

Fig.7 zeigt eine bevorzugte Ausführungsform für ein Element, das zur Polarisationsbeeinflussung eine mechanische Wirkung auf eine Faser 100 ausübt, die z.B. Bestandteil der Elemente A-DGD, T-DGD, DGD oder 1' bzw. 12 ist. Zur Verteilung der mechanischen Wirkung auf eine möglichst große Faserlänge ist in einem Gehäuse 121' ein Ring 121 vorgesehen, auf dem die Faser 100 ohne Verdrehung aufgewickelt ist. Nicht dargestellt sind die Einführung der Faser in den Ring und die Herausführung der Faser aus dem Ring bzw. dem Gehäuse. Der Ring 121 besteht beispielsweise aus einem dünnen, verformbaren Edelstahlteil. In dem Ring (121) ist ein druckausübendes Element 122, beispielsweise ein Piezoelement angeordnet, das sich - einseitig über ein Ausgleichselement 122' - an zwei Kreissegmenten 123 abstützt, die wiederum an dem Ring 121 anliegen. Gegenüberliegend zu den Kreissegmenten 123 sind Gegensegmente 124 vorgesehen, die sich am Gehäuse 121' abstützen und an den Faserstücken anliegen, so daß sie bei einer entsprechenden Elongation des Elements 122 Druck auf die Faser 100 ausüben. Durch eine Elongation des Piezoelements 122 kann damit gezielt die Faser 100 mechanisch belastet werden.

Vorstehend ist die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen ohne Beschränkung der Allgemeinheit beschrieben

worden. Selbstverständlich sind die verschiedensten Abwandlungen möglich; ferner ist nicht nur möglich, die verschiedenen, in den Ansprüchen als unabhängige Erfindungen beanspruchten Merkmale der einzelnen Elemente des vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiels miteinander zu kombinieren, sondern auch möglich, einzelne Merkmale mit Ausführungsformen für andere Elemente zu kombinieren, wie sie aus dem Stand der Technik bekannt sind.

Die erfindungsgemäß vorgesehene Emulationseinheit kann selbstverständlich auch in Vorrichtungen Verwendung finden, die nicht zur Kompensation von Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingten Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere Transmissionsfasern, dienen, sondern lediglich zur Erzeugung von PMD-bedingten Verzerrungen beispielsweise für Testzwecke.

In jedem Falle weist die Faserstrecke nach einer erfindungsgemäßen PMD-Kompensation bei der Wellenlänge des Sendelasers eine zu vernachlässigende PMD auf. Dieser Zustand bleibt auch bei Veränderung der Faserstrecke erhalten.

PATENTANSPRÜCHE

1. Anordnung zur Kompensation Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere Transmissionsfasern, mit
  - einer Meßeinrichtung für PMD-bedingte Verzerrungen,
  - einer Emulationseinheit für einstellbare PMD-Werte, und
  - einer Regeleinheit, an der das Ausgangssignal der Meßeinrichtung anliegt, und die die Emulationseinheit steuert,dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit die PMD-Emulationseinheit derart ansteuert, daß eine Endlos-Kompensation der PMD-bedingten Signalverzerrung erfolgt.
2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch **gekennzeichnet**, daß die PMD-Emulationseinheit ein variables PMD-Verzögerungsglied aufweist, das aus zwei PMD-behafteten Elementen mit einem dazwischen angeordneten Polarisationssteller besteht.
3. Anordnung nach Anspruch 2, dadurch **gekennzeichnet**, daß die PMD-behafteten Elemente dispersive Elemente sind.

4. Anordnung nach Anspruch 3,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die PMD-behafteten Elemente des variablen PMD-Verzögerungsgliedes polarisationserhaltende Fasern sind.
5. Anordnung nach Anspruch 2,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß der Polarisationssteller des variablen PMD-Verzögerungsgliedes eine  $\lambda/2$ -Wellenplatte oder einen Faraday-Rotator aufweist.
6. Anordnung nach Anspruch 2,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß der Polarisationssteller durch eine drehbare Verbindung der Koppelstelle der beiden PMD-behafteten Elemente realisiert ist.
7. Anordnung zur Kompensation Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere Transmissionsfasern, mit
  - einer Meßeinrichtung für PMD-bedingte Verzerrungen,
  - einer Emulationseinheit für einstellbare PMD-Werte, und
  - einer Regeleinheit, an der das Ausgangssignal der Meßeinrichtung anliegt, und die die Emulationseinheit steuert,dadurch **gekennzeichnet**, daß die Emulationseinheit mindestens eine Basis-Emulationseinheit aufweist, die aus zwei DGD-Elementen (Differential-Group-Delay-Elemente) mit jeweils einer bestimmten festen Verzögerungszeit für das ankommende Signal

besteht, die miteinander über ein Verbindungselement verbunden sind, das als Transformationselement wirkt, wobei alle drei Elemente einen bestimmten Winkel der Doppelbrechungsachsen haben, daß sich die Doppelbrechungsachsen des Verbindungselements bezüglich ihrer Winkellage von den Doppelbrechungsachsen der beiden DGD-Elemente unterscheiden, und  
daß wenigstens ein Stellelement für jede Basis-Emulationseinheit vorgesehen ist, das auf eines der Elemente dieser Basis-Emulationseinheit derart wirkt, daß durch eine geringfügige Änderung der Verzögerungszeit des beeinflussten Elements die DGD der Anordnung vollständig einstellbar ist.

8. Anordnung nach Anspruch 7,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Elemente PM-Fasern sind, und  
daß das Stellelement auf wenigstens eines der DGD-Elemente eine mechanische Wirkung zur Änderung der Verzögerungszeit und damit der Polarisierung ausübt.
9. Anordnung nach Anspruch 8,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß das oder die Stellelemente, die eine mechanische Wirkung ausüben, Faserquetscher oder -stretcher mit elektrisch steuerbaren Elementen, wie Piezo-Elementen sind, die eine mechanische Wirkung auf die PM-Faser ausüben.
10. Anordnung nach Anspruch 9,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß wenigstens eines der

Stellelemente zur Verteilung der mechanischen Wirkung auf eine möglichst große Faserlänge einen Ring aufweist, auf dem die PM-Faser ohne Verdrehung aufgewickelt ist.

11. Anordnung nach Anspruch 4 oder 10,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß wenigstens ein druck-  
ausübendes Element an wenigstens einer Stelle  
Druck auf eine Mehrzahl von Faserstücken der auf-  
gewickelten Faser ausübt.
12. Anordnung nach Anspruch 11,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß das druckausübende  
Element ein elongierendes Element, wie ein Piezo-  
element ist, das wenigstens ein Kreissegment be-  
aufschlagt, das am Ring anliegt, und  
daß wenigstens zu einem Teil der Kreissegmente Ge-  
gensegmente vorgesehen sind, die an den Faserstük-  
ken anliegen und Druck auf die Faser ausüben.
13. Anordnung nach Anspruch 1 oder 7,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Elemente doppel-  
brechende Kristalle sind, deren Doppelbrechung  
elektronisch einflußbar ist.
14. Anordnung nach Anspruch 7,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Verzögerungszeit  
der beiden DGD-Elemente jeder Basis-Emulations-  
einheit gleich und deutlich größer als die des zu-  
gehörigen Verbindungselements ist.



15. Anordnung nach Anspruch 7,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß der Winkel der Doppelbrechungsachse des ersten DGD-Elements  $0^\circ$  und des zweiten DGD-Elements  $90^\circ$  und des Verbindungselements  $45^\circ$  oder  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ$  oder  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ$  oder entsprechend gewählt ist.
16. Anordnung nach Anspruch 7,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß den zwei DGD-Elementen und dem Verbindungselement ein weiteres Element zur Einstellung eines beliebigen Eingangs-PSP vorgeschaltet ist.
17. Anordnung nach Anspruch 16  
dadurch **gekennzeichnet**, daß das vorgeschaltete Element ein weiteres doppelbrechendes Element, wie z.B. eine PM-Faser, aufweist, und  
daß sich die Winkel der Doppelbrechungsachsen des vorgeschalteten Elements und des ersten DGD-Elements unterscheiden.
18. Anordnung nach Anspruch 17,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Winkeldifferenz  $45^\circ$  beträgt.
19. Anordnung nach Anspruch 16,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß das vorgeschaltete Element ein weiteres doppelbrechendes Element, wie z.B. eine PM-Faser, aufweist, und  
daß ein Stellelement auf das vorgeschaltete Element und das erste DGD-Element eine Wirkung zur

Änderung der Verzögerungszeit und damit der Polarisation ausübt.

20. Anordnung nach Anspruch 19,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß das vorgeschaltete Element und/oder das Verbindungselement aus zwei PM-Fasern oder zwei doppelbrechenden Kristallen mit unterschiedlicher Winkellage der Doppelbrechungsachsen bestehen.
21. Anordnung nach Anspruch 19,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß das Stellelement auf eine der beiden Fasern oder auf einen der Kristalle wirkt.
22. Anordnung nach Anspruch 7,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß mindestens zwei Anordnungen zur Einstellung einer variablen DGD, von denen wenigstens eine eine Basis-Emulationseinheit gegebenenfalls mit einem PSP-Einstellelement aufweist, hintereinander geschaltet sind.
23. Anordnung nach Anspruch 22,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die einzelnen Anordnungen zur Kompensation PMD höherer Ordnung aus Basis-Emulationseinheiten mit DGD-Elementen mit unterschiedlicher Einzellaufzeit bestehen.
24. Anordnung zur Kompensation Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere Transmissionsfasern, mit

- einer Meßeinrichtung für PMD-bedingte Verzerrungen,
- einer Emulationseinheit für einstellbare PMD-Werte,
- einer Regeleinheit, an der das Ausgangssignal der Meßeinrichtung anliegt, und die die Emulationseinheit steuert,

oder nach Anspruch 1 oder 7,

dadurch **gekennzeichnet**, daß die Meßeinrichtung zur Erfassung der PMD die Polarisation aller in dem aus der Emulationseinheit austretenden Signal enthaltenen Spektralanteile erfaßt.

25. Anordnung nach Anspruch 24,

dadurch **gekennzeichnet**, daß die Meßeinrichtung einen Polarisator und einen nach dem Polarisator angeordneten optoelektrischen Wandler, wie einen Fotoempfänger aufweist, und

daß eine Polarisationsanpaßeinheit vorgesehen ist, die die Ausgangspolarisation der Emulationseinheit an die des Polarisators anpaßt.

26. Anordnung nach Anspruch 24,

dadurch **gekennzeichnet**, daß die Meßeinrichtung einen Polarisationsstrahlteiler aufweist, an dessen Ausgangsanschlüssen optoelektrische Wandler, wie Fotoempfänger vorgesehen sind, deren Signale zur Generierung eines Ist-Signals für die Regeleinheit einer Quotientenbildung unterzogen werden.

27. Anordnung nach Anspruch 26,

dadurch **gekennzeichnet**, daß zur Erfassung der Po-

larisation eine an sich bekannte Polarimeter-Anordnung vorgesehen ist.

28. Anordnung nach Anspruch 24,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Polarisationsanpaßeinheit zwei doppelbrechende Elemente aufweist, deren Doppelbrechungsachsen einen Winkel ungleich  $0^\circ$ , bevorzugt  $45^\circ$  einschließen, und  
daß zur Einstellung der Ausgangspolarisation wenigstens ein Stellelement vorgesehen ist, das auf mindestens eines der doppelbrechenden Elemente wirkt.
29. Anordnung nach Anspruch 28,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die doppelbrechenden Elemente doppelbrechende Kristalle oder PM-Fasern sind.
30. Anordnung nach Anspruch 1, 7 oder 18,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß eine Polarisationsanpaßeinheit direkt vor der Polarisationsmeßeinheit angeordnet oder direkt hinter dem Emulator angeordnet ist.
31. Anordnung nach Anspruch 1, 7 oder 18,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß eine Polarisationsanpaßeinheit als zusätzliches Element in den Emulator integriert ist.
32. Anordnung nach Anspruch 25,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Polarisationsanpaßeinheit ein vor- oder nachgeschaltetes DGD-

Element mit einem Winkel von  $45^\circ$  ist, wobei auf dieses nachgeschaltete Element und dem davor oder dahinter befindlichen DGD ein Stellelement wirkt.

33. Anordnung nach Anspruch 1 oder 31, dadurch **gekennzeichnet**, daß der PMD-Emulations-einheit ein variabler Endlos-Polarisationssteller mit ausreichenden Freiheitsgraden vorgeschaltet ist, der die beiden PSP der zu kompensierenden Faser auf die PSP des variablen PMD-Verzögerungsgliedes abbildet, ohne in ein lokales Minimum der Gesamt-PMD auszuregeln.
34. Anordnung nach Anspruch 33, dadurch **gekennzeichnet**, daß der variable Polarisationssteller eine Anordnung aus vier hintereinander angeordneten  $\lambda/4$ -Wellenplatten aufweist.
35. Anordnung zur Kompensation Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere Transmissionsfasern, mit
- einer Meßeinrichtung für PMD-bedingte Verzerrungen,
  - einer Emulationseinheit für einstellbare PMD-Werte,
  - einer Regeleinheit, an der das Ausgangssignal der Meßeinrichtung anliegt, und die die Emulationseinheit steuert,
- oder nach Anspruch 1, 7 oder 18, dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit mehrere Regelschleifen aufweist, in denen sie Stell-

elemente der Emulationseinheit mit unterschiedlichen Frequenzen moduliert,  
daß die Regeleinheit aus dem Ausgangssignal der Meßeinrichtung Informationen über den Betrag und die Phasenlage des aus der Emulationseinheit austretenden Signals ermittelt und diese Informationen zur Durchführung einer schnellen und direkten Regelung verwendet.

36. Anordnung nach Anspruch 35,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Bandbreite bzw. Grenzfrequenz des optoelektrischen Wandler der Modulationsfrequenz angepaßt ist, und  
daß die Regeleinheit die einzelnen Regelschleifen derart einstellt, daß die Polarisierung für alle im Signal enthaltenen Spektralanteile konstant ist.
37. Anordnung nach Anspruch 36,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit zur Einstellung einer konstanten Polarisierung für alle im Signal enthaltenen Spektralanteile als Regelkriterium einen minimalen Photostrom des oder der optoelektrischen Wandler verwendet.
38. Anordnung nach Anspruch 36,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit das Ausgangssignal des oder der optoelektrischen Wandler frequenz- und phasenselektiv auswertet.
39. Anordnung nach Anspruch 38,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit analoge Regelkreise für die Stillelemente aufweist,

an denen die frequenz- und phasenselektiven Signale anliegen.

40. Anordnung nach Anspruch 35,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit auch die Stellelemente der Polarisationsanpaßeinheit ansteuert.
41. Anordnung nach Anspruch 40,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit die Stellelemente der Polarisationsanpaßeinheit mit dem gleichen Regelalgorithmus wie die Emulations-einheit ansteuert.
42. Anordnung nach Anspruch 35,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit zur Ausführung verschiedener Funktionen, wie z.B. zur frequenz- und phasenselektiven Auswertung oder zur Steuerung des Ablaufes innerhalb der Anordnung wenigstens eine CPU oder wenigstens einen DSP-Schaltkreis aufweist.
43. Anordnung nach Anspruch 35,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit wesentliche Teile des Regelalgorithmus mit analogen Schaltkreisen ausführt.
44. Anordnung nach Anspruch 1,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit zur Erzeugung eines Regelsignals Filter aufweist, die hochfrequente Spektralanteile des Datensignals ausfiltern, so daß das gefilterte Signal den Ver-

zerrungsgrad des detektierten Datensignals wiedergibt.

45. Anordnung nach Anspruch 44,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit zwei unterschiedliche Filter mit jeweils nachgeschalteten Detektoren aufweist, die aus dem Datensignal zwei analoge Signale erzeugen, deren Verhältnis den Verzerrungsgrad des Datensignals unabhängig von der Signalleistung wiedergibt.
46. Anordnung nach Anspruch 45,  
dadurch **gekennzeichnet**, daß die Regeleinheit die PMD-bedingte Signalverzerrung dadurch minimiert, daß sie abwechselnd an den polarisationsbeeinflussenden Elementen des variablen Polarisationsstellers und des variablen PMD-Verzögerungsgliedes nachstellt.

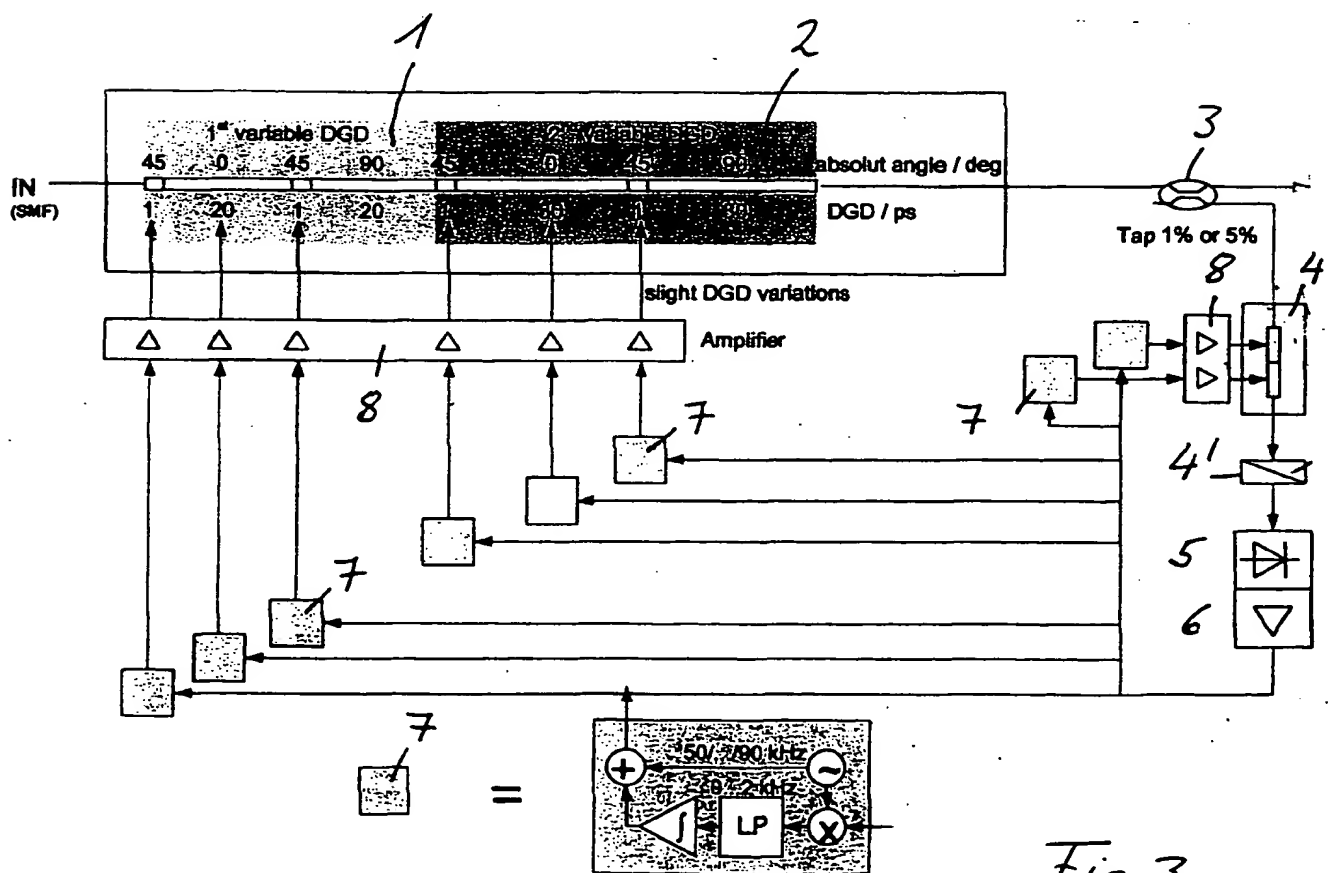
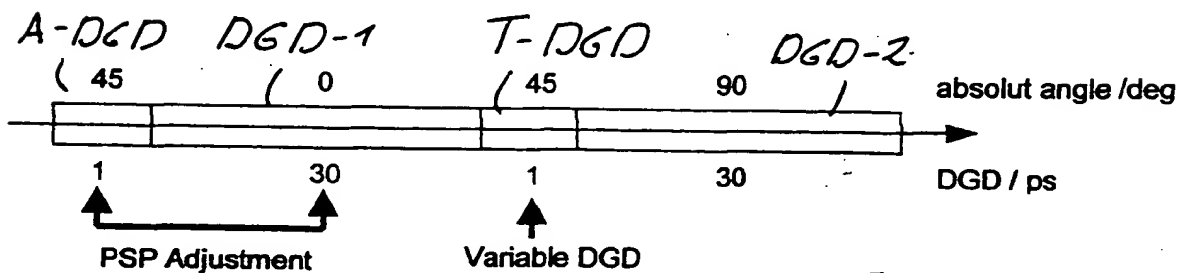
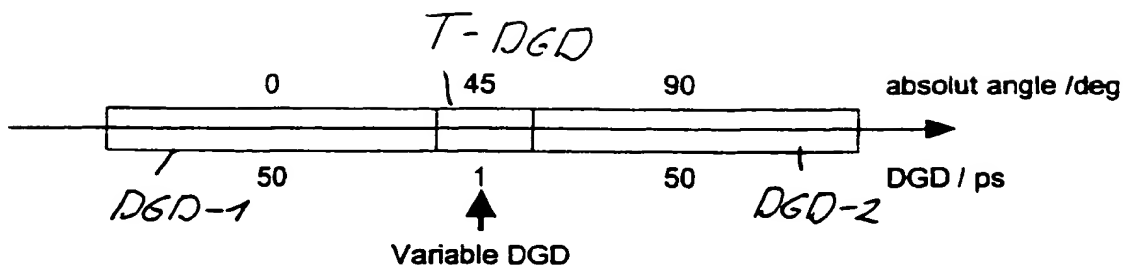


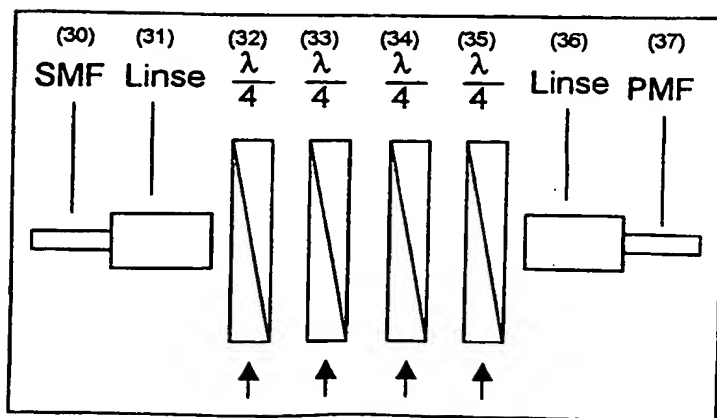
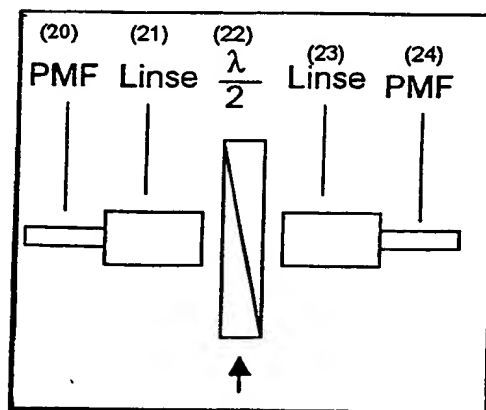
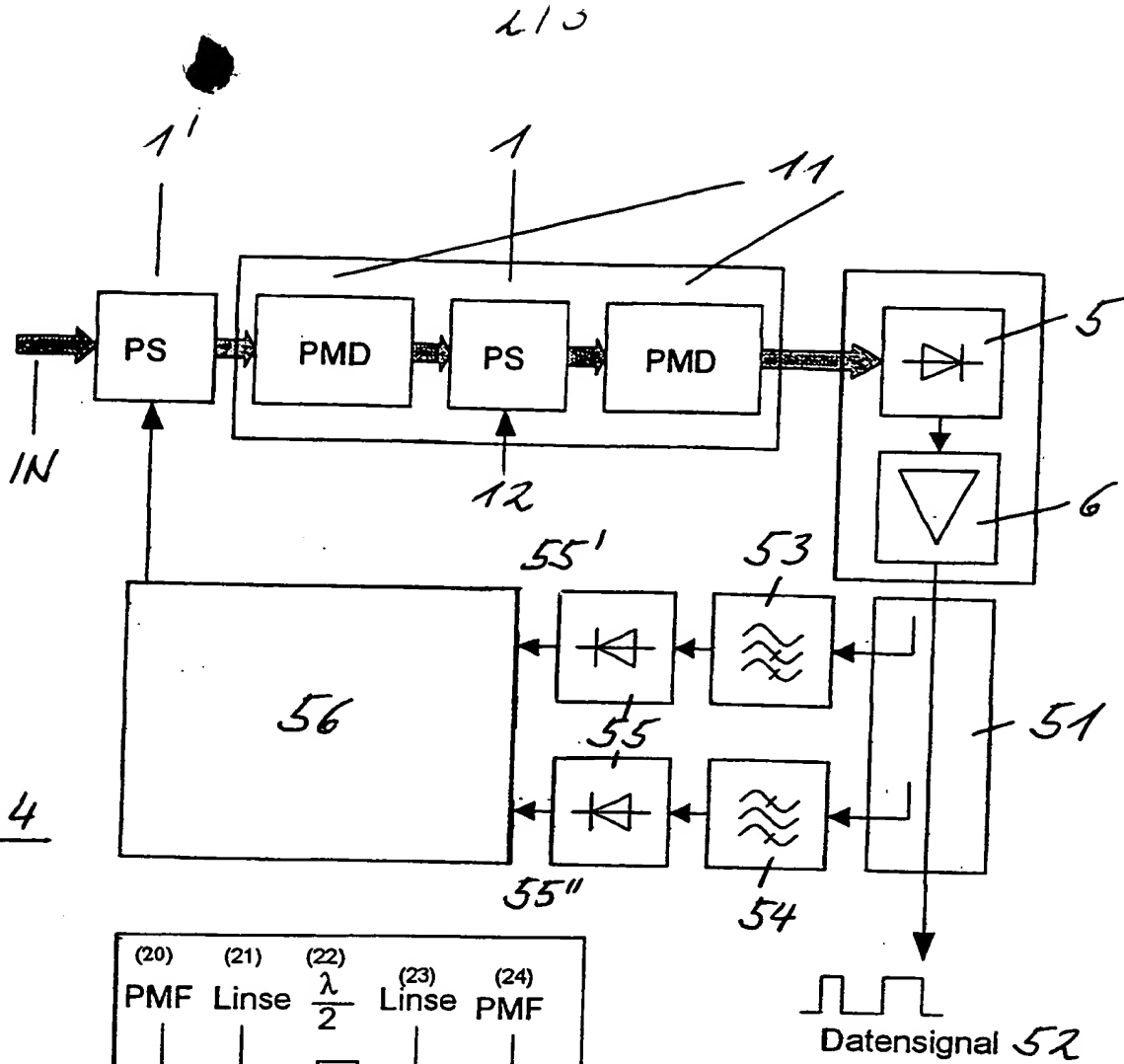
### ZUSAMMENFASSUNG

Beschrieben wird eine Anordnung zur Kompensation Polarisations-Modulations-Dispersions (PMD)-bedingter Verzerrungen in optischen Transmissionssystemen und insbesondere Transmissionsfasern, mit

- einer Meßeinrichtung für PMD-bedingte Verzerrungen,
- einer Emulationseinheit für einstellbare PMD-Werte, und
- einer Regeleinheit, an der das Ausgangssignal der Meßeinrichtung anliegt, und die die Emulationseinheit steuert.

Erfindungsgemäß werden sowohl die Emulationseinheit als auch die Meßeinrichtung für die PMD-bedingten Verzerrungen sowie die Regeleinheit und das verwendete Regelkriterium (alleine oder in Kombination) weitergebildet.





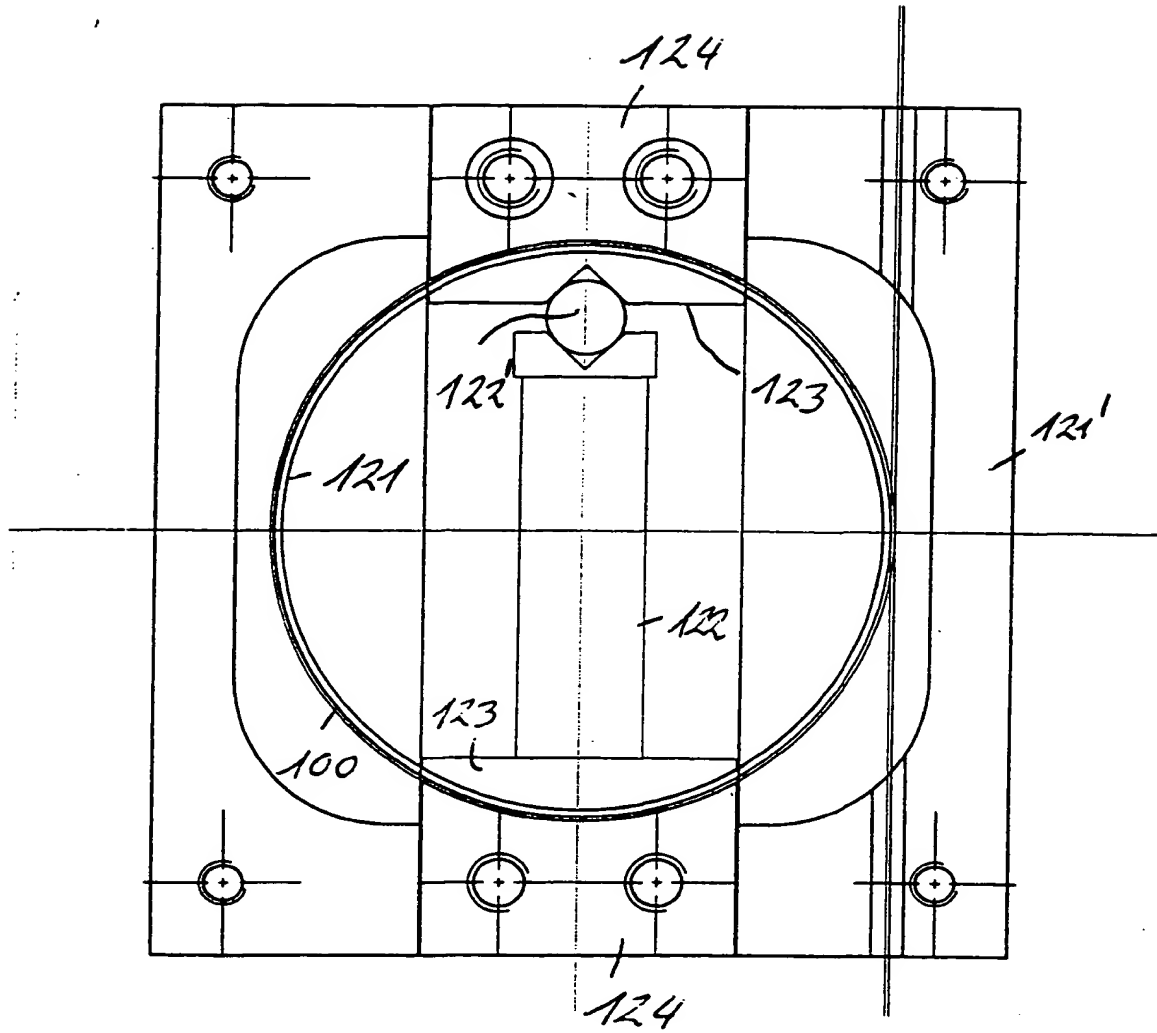


Fig. 7